

# MoRFUS: Mobile Reinigungseinheit für Förderketten basierend auf Ultraschall

Reinhard Schemmel, Tobias Hemsel und Walter Sextro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Paderborn, Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, 33098 Paderborn,  
E-Mail: reinhard.schemmel@upb.de

## Einleitung

In der industriellen Fertigung werden zum Transport von Bauteilen häufig Förderketten genutzt. Obwohl die Förderketten meist nicht direkt mit den Arbeitsmedien in Berührung kommen, werden sie indirekt durch vagabundierende Stäube und Pulver, die an der geölten Kette anhaften, im Laufe der Zeit stark verschmutzt. Ein derart im Betrieb verschmutztes Kettenglied ist in Abbildung 1 dargestellt. Um die Lebensdauer der Ketten zu erhöhen und das Herunterfallen von Schmutzpartikel auf die Produkte zu vermeiden, muss die Kette regelmäßig gereinigt werden.



Abbildung 1: Im Betrieb verschmutztes Kettenglied vor der Reinigung

Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Systems, das in der Lage ist, ein einzelnes Kettenglied in unter 60 s mittels Ultraschall zu reinigen. In [1] wurde in ersten Versuchen nachgewiesen, dass Stabschwinger in Abhängigkeit des Sonotrodenabstands zum Reinigungsobjekt und der Ultraschallamplitude eine intensive Reinigungswirkung entfalten. Das Konzept der Reinigungsanlage sieht deshalb vor, im ersten Schritt die stark verschmutzten Kettenglieder durch ein hochintensives Kavitationsfeld von direkt eingetauchten Stabschwingern vorzureinigen und anschließend schwer zugängliche Bereiche wie Hinterschneidungen oder Bohrungen mittels konventioneller Tauchschwinger von Verschmutzungen zu befreien.

Für den Stabschwinger wird die sogenannte „Barbell“-Sonotrode untersucht; diese wird unter anderem auch in der Sonochemie verwendet. Ein wesentliches Merkmal der Sonotrode ist eine hohe Amplitudenübersetzung bei einer gleichzeitig großen Abstrahlfläche. Neben dem Entwurf mittels der  $\lambda/2$ -Synthese wird die Reinigungswirkung der Sonotrode in Abhängigkeit der Ultraschallamplitude und dem Abstand zum Reinigungsobjekt in einer Versuchsreihe untersucht. Zur genaueren Betrachtung der Reinigungsmechanismen eines Stabschwingers werden abschließend Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vorgestellt und analysiert.

## Entwurf der Barbell-Sonotrode

In der Ausführung als Sonotrode mit einer vollen Wellenlänge („Full-wave-Barbell-horn“) bietet diese die Möglichkeit, neben einer hohen Amplitudenübersetzung

gleichzeitig eine große Abstrahlfläche beizubehalten [2]. Die Sonotrode ist in fünf Teilbereiche mit den Längen  $l_1 \dots l_5$  und den Durchmessern  $d_1 \dots d_5$  gegliedert, siehe Abbildung 2.

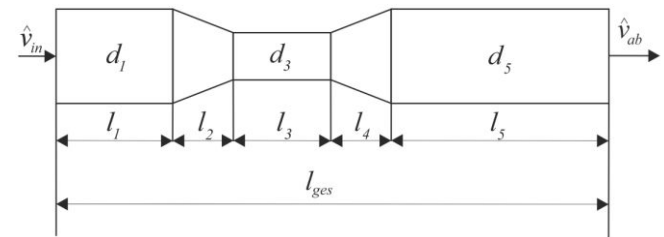


Abbildung 2: Barbell-Sonotrode mit fünf Teilbereichen und der Eingangsamplitude  $\hat{v}_{in}$  und der Abstrahlamplitude  $\hat{v}_{ab}$ .

Zur Ermittlung der Längenverhältnisse der Teilbereiche für eine möglichst große Amplitudenverstärkung  $M = \hat{v}_{ab} / \hat{v}_{in}$  erfolgte mit dem Vorgehen aus [3] eine Analyse nach der  $\lambda/2$ -Synthese in MATLAB, siehe Abbildung 3.

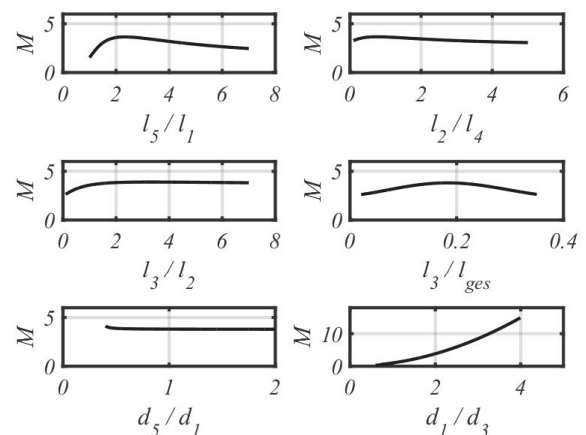


Abbildung 3: Amplitudenübersetzung  $M = \hat{v}_{ab} / \hat{v}_{in}$  in Abhängigkeit der Längen- und Durchmesser-Verhältnisse

Bei der Variation der Längenverhältnisse wurden  $l_{ges}$  auf 250 mm,  $d_1$  und  $d_5$  auf 40 mm sowie  $d_3$  auf 20 mm festgelegt. Bei der Variation des Längenverhältnisses  $l_5/l_1$  wurden die übrigen Längen  $l_2, l_3$  und  $l_4$  auf jeweils 30 mm festgelegt. Die Analyse ergibt ein Wert von 2.5 für  $l_5/l_1$ , sodass  $M$  maximal wird. Mit diesem Verhältnis wird die zweite Variation der beiden konischen Bereiche durchgeführt; ab einem Verhältnis von  $l_2/l_4 = 1$  bleibt  $M$  annähernd konstant, sodass  $l_2 = l_4$  gesetzt werden kann. Gleiches gilt für die Variation der Länge  $l_3$  zu  $l_2$ ; hier bleibt  $M$  ab dem Wert 2 konstant. Die letzte Variation von

$l_3$  zur Gesamtlänge ergibt mit den vorher ermittelten Verhältnissen ein Maximum beim Wert  $l_3/l_{ges} = 0.16$ . Werden die Längen nach den oben ermittelten Verhältnissen ausgewählt, dann ist die Amplitudenvergrößerung  $M$  der Sonotrode im Wesentlichen vom Durchmesser-Verhältnis  $d_3/d_1$  abhängig und unabhängig vom Verhältnis des Eingangsdurchmessers  $d_1$  zum Ausgangsdurchmesser  $d_5$ . Die Schwingungsform und die Geometrie der Sonotrode mit den oben ermittelten Längenverhältnissen ist in Abbildung 4 dargestellt; durch die konische Verjüngung im Schwingungsknoten stellt sich eine Amplitudenvergrößerung von  $M=3.8$  ein. Der zweite Querschnittsübergang von  $d_3$  auf  $d_5$  findet hingegen in einem Schwingungsbauch statt und ist neutral für die Schwingungsamplitude. Das anschließende zylindrische Endstück mit der Länge  $l_5$  stellt ein  $\lambda/2$ -Stück dar und bewirkt, dass sich nur eine primäre Richtung der Schallabstrahlung ergibt, während das direkte eintauchen des konischen Endstückes eine beidseitige Abstrahlcharakteristik bewirken würde.

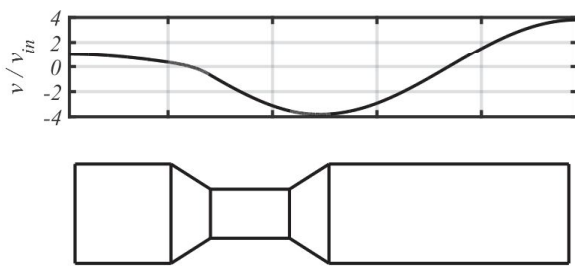


Abbildung 4: In MATLAB ermittelter Amplitudenverlauf der Barbellsonotrode.

Die Auslegung der Sonotrode erfolgt für den Ultraschall-generator „Generator Serie 900 B“ mit zugehörigem Transducer „Konverter 902 J“ (20 kHz) der Fa. Branson.

Zur Festlegung der gewünschten Amplitudenvergrößerung  $M$  wurde eine Abschätzung über die Abstrahlleistung der Sonotrode unter Kavitation durchgeführt. Die maximale Leistung des Transducers, die ohne Kühlung im Dauerbetrieb gestellt werden kann, liegt bei 800 W. Um die Abstrahlleistung in Wasser unter Kavitation abzuschätzen, wurde der Zusammenhang aus [2] um eine radiale Abstrahlungskomponente erweitert:

$$P_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} p_0 (\hat{v}_{ab} A_{ab} + \bar{v}_r A_m) \quad (1)$$

In Gleichung (1) ist  $\hat{v}_{ab}$  die Geschwindigkeitsamplitude der Abstrahlfläche,  $p_0$  der statische Wasserdruck, welcher mit 1 bar angenommen wird, und  $A_{ab}$  die Abstrahlfläche mit dem Durchmesser  $d_5$  am Sonotrodenende. Die Erweiterung erfolgt durch  $\bar{v}_r$ , die gemittelte radiale Amplitude über die Mantelfläche  $A_m$ , welche sich im eingetauchten Bereich befindet. Die Geschwindigkeit  $\hat{v}_{ab}$  ergibt sich aus der bekannten Geschwindigkeitsamplitude des Transducers und dem Verstärkungsfaktor  $M$ ; der Verstärkungsfaktor wird auf den Sollwert 3.5 festgelegt. Die mittlere radiale Abstrahlamplitude über die eingetauchte Mantelfläche wurde mittels der Finite Elemente Methode in ANSYS bestimmt. Für die verwendete Sonotroden- / Transducer-Kombination

ergibt sich nach Gleichung (1) eine Abstrahlleistung von 480 W. Die nach dem Aufbau der Sonotrode gemessene elektrische Effektivleistung im eingetauchten Zustand bis zum ersten Schwingungsknoten und bei maximaler Amplitude liegt bei ca. 490 W und stimmt gut mit der abgeschätzten Kavitationsleistung überein.

Die Schwingungsform der Sonotrode wurde mittels eines Inplane-Laservibrometers (Polytec LSV 060, OFV 3300) sowohl im in Wasser eingetauchten Zustand als auch frei schwingend in Luft vermessen. In Abbildung 5 sind die gemessenen Verläufe dem theoretischen Verlauf, welcher mit der Finite-Elemente-Methode in ANSYS ermittelt wurde, gegenübergestellt. Die Schwingungsform eingetaucht in Wasser ändert sich nicht gegenüber der Schwingungsform frei schwingend an Luft, da das kavitierende Wasser eine überwiegend dämpfende Last für das Ultraschall-System darstellt. Die Messergebnisse stimmen gut mit den Simulationsergebnissen überein und es stellt sich die gewünschte Amplitudenvergrößerung  $M=3.5$  ein.

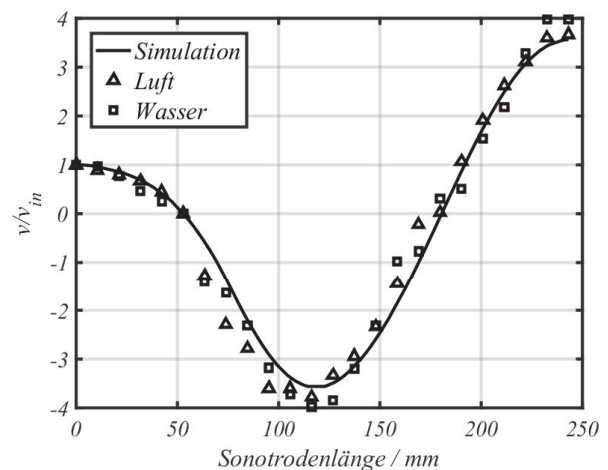
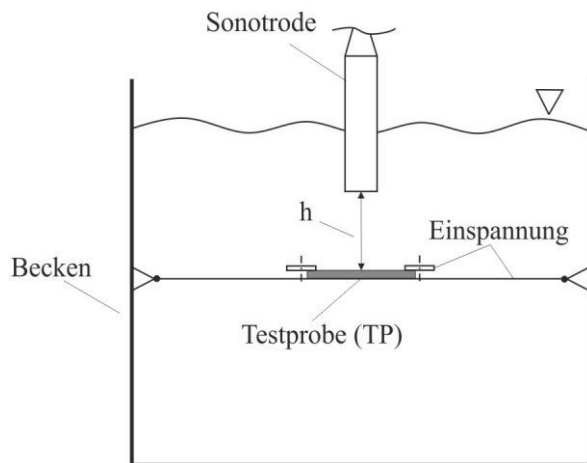


Abbildung 5: Schwingungsform der Barbell Sonotrode: Theoretisch in ANSYS ermittelt (-), frei schwingend in Luft gemessen ( $\Delta$ ) und eingetaucht in Wasser gemessen ( $\square$ ).

## Reinigungsversuche mit der Barbell Sonotrode

Die Versuchsdurchführung mit der Barbell-Sonotrode beinhaltet die Variation des Abstandes zwischen Sonotrode und Reinigungsobjekt und die Variation der Schwingamplitude der Sonotrode. In Abbildung 6 ist eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus gezeigt. Die Sonotrode wurde oberhalb der Kupferplatten positioniert, welche mit einem Öl-Sandgemisch verschmutzt wurden. Die Verunreinigung ist anschließend über 2 h und 200 °C eingebrannt worden, um die real auftretende Verschmutzung möglichst genau abzubilden. Die Testproben wurden mit einer Einspannung in einem Wasserbecken (1000 x 400 x 500 mm) befestigt. Der Abstand zwischen dem Ende der Sonotrode und der Testprobe wurde in den Schritten 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm und 20 mm variiert und für jeden Abstand die Geschwindigkeitsamplitude am Sonotrodenende auf die Werte 50 %, 75 % und 100 %, bezogen auf die maximal mögliche Geschwindigkeitsamplitude, festgelegt. Die maximale Geschwindigkeitsamplitude (100 %) entspricht einer Schwingamplitude  $\hat{v}_{ab} = 3.4 \text{ m/s}$ , welche für eine

bis zum ersten Schwingungsknoten in Wasser eingetauchte Sonotrode ermittelt wurde. Im Folgenden wird statt Geschwindigkeitsamplitude der Begriff Amplitude verwendet.



**Abbildung 6:** Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für die Reinigungsversuche

Die Versuchsdauer betrug jeweils 0,8 s und entspricht der Verweildauer der Kette unter der Sonotroden-Abstrahlfläche während des späteren Betriebes der Förderanlage. Es wurde Leitungswasser im nicht entgasten Zustand bei Raumtemperatur als Reinigungsmedium verwendet.

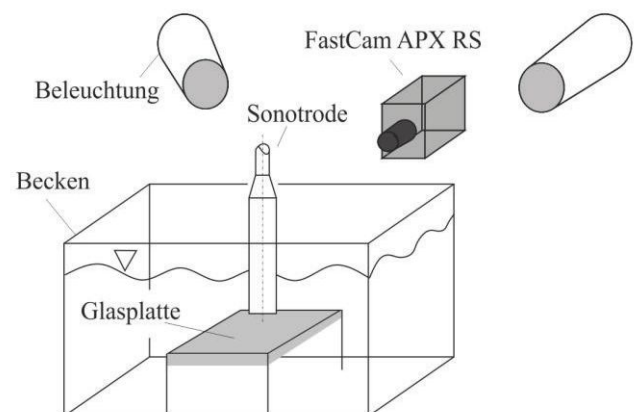
Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Bis zu einem Abstand von 4 mm ist ein deutlicher Reinigungseffekt erkennbar, wobei der Reinigungsgrad für 50 % Amplitude schneller abnimmt als für 100 % Amplitude. Für einen Abstand von 4 mm und eine Amplitude von 100 % ist außerdem zu erkennen, dass Schmutzreste, welche bereits gelöst wurden, im Zentrum der Reinigungsfläche verbleiben, welche für geringere Abstände (1 und 2 mm) an den Rand transportiert wurden. Dieser Effekt ist für eine Amplitude von 50 % bereits ab 2 mm Abstand zu beobachten. Die Vergrößerung des Abstands auf 8 mm und weiter bewirkt eine deutliche Abnahme des Reinigungsgrades für die gewählte Reinigungsdauer von 0,8 s. Während für kleine Abstände die gesamte Fläche unterhalb der Sonotrode gereinigt wurde, verringert sich der Querschnitt der Reinigungsfläche mit der Vergrößerung des Abstands.

Zur genaueren Untersuchung des Reinigungseffektes wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Spaltes zwischen Sonotrode und Reinigungsobjekt durchgeführt, siehe Abbildung 7. In einem Becken (300 x 200 x 200 mm) wurde ein Rahmen mit einer montierten Glasplatte positioniert und die Sonotrode auf diese ausgerichtet. Mit der Hochgeschwindigkeitskamera FastCam APX RS der Fa. Photron wurden Aufnahmen für die Abstände 1 bis 20 mm mit 20.000 fps und einer Belichtungsdauer von 1/102.000 s durchgeführt; die Amplitude der Sonotrode betrug 100 %.

		Amplitude / %		
		50	75	100
h / mm	1			
	2			
	4			
	8			
	12			
	20			

**Tabelle 1:** Reinigungsergebnisse von künstlich verschmutzten Kupferplatten bei 0,8 s Beschallungsdauer für verschiedene Geschwindigkeitsamplituden und Abstände.

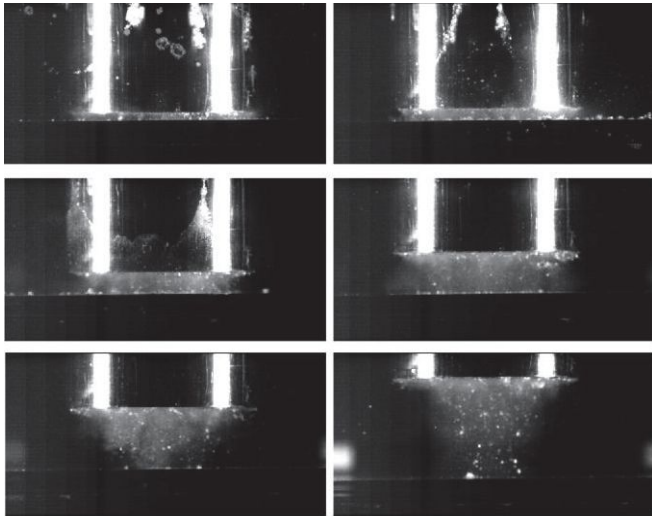
Im Folgenden werden repräsentative Standbilder der Filmaufnahmen in Abbildung 8 betrachtet. Für die Abstände 1 bis 4 mm ist zu sehen, dass nahezu der gesamte Bereich zwischen Sonotrode und Glasplatte als kavitierende Zone angesehen werden kann. Für 4 mm Abstand sind im Randbereich bereits Einschnürungen der Kavitationswolke zu erkennen, die in Einklang mit der Verringerung der Reinigungswirkung in der Randzone des Reinigungs-bereiches stehen (vgl. Tabelle 1).



**Abbildung 7:** Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen



Diese Einschnürungen nehmen mit größer werdendem Abstand zu, sodass der kavitierende Bereich unterhalb der Sonotrode eine konische Form erreicht. Diese Form ist insbesondere für die Abstände 12 mm und 20 mm deutlich ausgeprägt und steht im Zusammenhang mit der kleiner werdenden Reinigungsfläche.



**Abbildung 8:** Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei 100 % Geschwindigkeitsamplitude. V.l.n.r. und v.o.n.u.: 1, 2, 4, 8, 12 und 20 mm

## Zusammenfassung

Für die Reinigung von Förderketten wird derzeit eine Anlage aufgebaut, die auf der Ultraschallreinigung basiert. Um eine kurze Reinigungsdauer zu erzielen, wurde ein Konzept zur intensiven Vorreinigung starker Verschmutzungen basierend auf der Barbell-Sonotrode entwickelt. Die Sonotrode wurde gemäß der  $\lambda/2$ -Synthese in MATLAB auf ihre Eigenschaften untersucht und aufgebaut.

Um die Reinigungswirkung hochintensiver Kavitationsfelder unterhalb der Sonotroden-Abstrahlfläche zu dokumentieren, wurden in einer Versuchsreihe künstlich verschmutzte Testproben bei unterschiedlichen Abständen und Amplituden der Sonotrode betrachtet; die Einschaltdauer des Ultraschalls betrug jeweils 0,8 s. Es zeigte sich, dass bis zu einem Abstand von 4 mm eine intensive Reinigungsleistung beobachtet werden kann, die den gesamten Bereich unterhalb der Sonotrode vom Schmutz befreit. Die Reinigungsleistung ist dabei direkt von der Schwingamplitude abhängig: größere Amplituden führen zu größeren Reinigungsgraden.

Die Durchführung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ergab, dass bis zu einem Abstand von 4 mm im Spalt zwischen Sonotrode und Reinigungsobjekt eine durchgehende Kavitationsschicht ausgebildet wird. Mit zunehmenden Abstand erfährt diese eine Einschnürung und nimmt allmählich eine kegelförmige Form an, sodass die durch die Kavitation angegriffene Fläche auf dem Reinigungsobjekt und damit die effektiv gereinigte Fläche im Radius schrumpft.

## Danksagung

Die Autoren danken für die Förderung des hier beschriebenen Vorhabens im ZIM Projekt ZF 40329056115 durch das BMWi.

## Literatur

- [1] Mazue, G. Large-scale ultrasonic cleaning system: Design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz). *Ultrasonics Sonochemistry* (2011), 895-900
- [2] Sergei, L. Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. *Ultrasonics Sonochemistry* (2007), 314-322
- [3] Zhiqiang, Fu. Investigations of the barbell ultrasonic transducer operated in the full-wave vibrational mode. *Ultrasonics* (2012), 578-586